稀土壳糖胺螯合盐对断奶仔猪生长性能、血清生化指标、营养物质消化率及粪中微生物菌群的影响

李方方[1] 周 晶[1] 朱宇旌[1] 张 鑫[1] 高 原[2] 孟 玲[2] 郭福来[2] 张 勇[1*]

（1.沈阳农业大学畜牧兽医学院，沈阳 110866；2.辽宁德宝农牧集团有限公司，沈阳 110171）

摘 要：本试验旨在研究饲粮中添加稀土壳糖胺螯合盐（rare earth-chitosan chelate，RECC）对断奶仔猪生长性能、血清生化指标、营养物质消化率及粪中微生物菌群的影响。试验选取240 头 28 日龄健康纯种大白仔猪，随机分成 4 组，每组 4 个重复，每个重复 15 头仔猪。对照组饲喂基础饲粮，试验组分别饲喂在基础饲粮中添加 0.02%、0.03%和 0.04% RECC 的饲粮。试验期 28 d。结果显示：1）与对照组相比，饲粮添加 0.02%和 0.03% RECC 显著提高断奶仔猪平均日增重和平均日采食量（P<0.05）、显著降低料重比（P<0.05），各 RECC 组断奶仔猪腹泻率均显著降低（P<0.05）。2）饲粮添加 0.02%和 0.03% RECC 显著提高断奶仔猪血清生长激素和免疫球蛋白 G 含量（P<0.05）。3）饲粮添加 0.02%和 0.03% RECC 显著提高断奶仔猪对干物质、粗蛋白质和粗脂肪消化率（P<0.05），饲粮添加 0.02% RECC 显著提高仔猪对 Ca 和 P 的消化率（P<0.05）。4）饲粮添加 RECC 对仔猪粪中大肠杆菌、双歧杆菌和乳酸杆菌数影响均不显著（P>0.05），但有降低大肠杆菌数的趋势。综上所述，饲粮中添加 RECC 可以通过提高断奶仔猪体内的激素含量、调节微生物平衡，进而改善仔猪的生长、免疫等功能，且 RECC 在断奶仔猪中较为适宜的添加量为 0.02%。

关键词：稀土壳糖胺螯合盐；断奶仔猪；生长性能；血清生化指标；营养物质消化率；粪中微生物菌群

稀土元素作为一种生理激活剂，可刺激动物机体新陈代谢，激活生长因子，促进酶活性的增加[1]；壳糖胺具有改善动物生产性能、调节动物对体脂的利用、广谱抗菌、提高动物机体免疫力等作用[2]。但稀土具有经口进入动物消化道后吸收量少的缺点，而壳糖胺由于壳聚糖分子的结构紧密也难以被动物体消化吸收[3]。稀土壳糖胺螯合盐（rare earth-chitosan chelate，RECC）是由稀土离子与壳糖胺分子通过特殊工艺螯成的一种绿色新型饲料添加剂，具有类似抗生素的生物学作用[4]，且具有毒性低、安全性高等特点。此外，在螯合物中壳糖

收稿日期：2015–09–15

基金项目：国家自然科学基金（31440082，31101253）

作者简介：李方方（1982–），女，辽宁阜新人，讲师，博士，主要从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: lffsyau@sina.com

*通信作者：张 勇，教授，硕士生导师，E-mail: syndzhy@126.com

胺可以作为一种良好的网状载体[5]，将稀土离子逐渐释放至动物体内，使酶免受金属离子的抑制，从而增加稀土离子的吸收效率；同时，由于稀土具有多个 4f 电子轨道，使其可以和壳糖胺分子配位产生很多种不同空间几何构型的配合物，这也加速了壳糖胺降解过程中的某些催化反应[6]。因此，RECC 可有效克服二者单独使用时吸收效率低的缺陷。

目前有关 RECC 在家禽、鱼类及反刍动物上的研究都表明，RECC 具有提高饲料转化率、加快动物生长速度、增强动物免疫功能以及挖掘动物潜能的作用[7-9]，但同时也有一些关于 RECC 并未表现出良好促生长效果的报道[10]。仔猪断奶初期常会出现食欲差、生长缓慢、腹泻消化机能紊乱等“早期断奶综合征”，严重困扰着养猪从业者[11]。有关 RECC 作用于断奶仔猪的研究鲜有报道，仅 He 等[12]曾报道 RECC 能够提高断奶仔猪的日增重、采食量和饲料转化率，但其确切的作用效果及机理还有待进一步深入系统验证；并且 RECC 的添加剂量被认为是提高动物生产性能的关键因素，过量添加会产生负面影响。因此，本试验拟通过在断奶仔猪饲粮中添加不同水平的 RECC，研究其对断奶仔猪生长性能、血清生化指标、营养物质消化率和粪中微生物菌群的影响，并给出适宜添加量，为 RECC 在仔猪生产中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用 RECC 制剂为上海德邦牧业有限公司生产的稀土元素螯合包，呈淡黄色颗粒状，RECC 含量为 13%，稀土有效成分为铈和镧。

1.2 试验动物及试验设计

本试验在辽宁德宝艾德蒙种猪场繁育场进行，试验仔猪由艾德蒙种猪场提供。试验采用完全随机化设计，选取平均体重为（7.53±0.25） kg 的 28 日龄大白断奶仔猪 240 头，随机分为 4 组，每组设 4 个重复，每个重复 15 头仔猪。试验分对照组（基础饲粮）、0.02% RECC 组（基础饲粮+0.02% RECC）、0.03% RECC 组（基础饲粮+0.03% RECC）和 0.04% RECC 组（基础饲粮+0.04% RECC）。预试期 7 d，正试期 28 d。

1.3 基础饲粮及饲养管理

试验基础饲粮参考 NRC（1998）配制，基础饲粮组成及营养水平见表 1。供试仔猪在同一栋半开放式猪舍内进行饲养，畜舍水泥全铺地面，配备全漏缝塑料质地板、不锈钢质饲槽和乳头式饮水器，舍温保持在（25±3） ℃，通风良好。仔猪每天定时饲喂 2 次，自由采食和饮水，记录每组每天的采食量。试验期间按猪场常规免疫操作程序进行防疫及消毒。

表 1　基础饲粮组成及营养水平（干物质基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis) %

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
玉米 Corn	70.00
豆粕 Soybean	18.00
膨化大豆 Extruded soybean	4.40
进口鱼粉 Imported fish meal	3.00
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.40
食盐 NaCl	0.30
石粉 Limestone	0.90
预混料 Premix[1)]	2.00
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]	
代谢能 ME/(MJ/kg)	13.37
粗蛋白质 CP	17.00
钙 Ca	0.84
有效磷 AP	0.43
可消化赖氨酸 Digestible Lys	1.00
可消化蛋氨酸 Digestible Met	0.24
可消化苏氨酸 Digestible Thr	0.64
可消化色氨酸 Digestible Try	0.16

[1)] 预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of diet：VA 8 000 IU，VD_3 1 228 IU，VE 15 IU，VK_3 3.0 mg，VB_1 1.3 mg，VB_2 3.1 mg，VB_6 1.2 mg，泛酸钙 calcium pantothenate 13.4 mg，氯化胆碱 choline chloride 500 mg，生物素 biotin 0.11 mg，烟酸 niacin 25 mg，叶酸 folic acid 0.68 mg， VB_{12} 0.03 mg，Fe 120 mg，Cu 10 mg，Zn 130 mg，Mn 100 mg，I 0.3 mg，Se 0.3 mg。

[2)] 代谢能为计算值，其余为实测值。ME was a calculated value, while the others were measured values.

1.4 测定指标及方法

1.4.1 生长性能的测定

于试验期第 1 天和第 28 天的清晨空腹称仔猪体重，记录每组每天的给料量、损失料量

和剩余料量，计算仔猪的平均日增重（ADG）、平均日采食量（ADFI）及料重比（F/G）。

每天 07：30 至 19：00 观察仔猪的排粪情况和精神状态，参照 Castillo 等[13]对每头猪每次排出的粪便进行感官评分。统计仔猪腹泻头次数，并计算腹泻率。

整个试验期内，每天对各组的仔猪死亡情况进行统计，计算死亡率。

1.4.2　血清生化指标的测定

试验仔猪于试验期最后 1 天 19：00 至 21：00 进行采血，每个重复随机选取 5 头仔猪，采用前腔静脉采血法每头取血 10 mL，采血完毕后静置 1～2 h，以 3 000 r/min 离心 15 min，分离血清，用移液枪取上层血清，分装于 2 mL 离心管中，于－20 ℃冰箱中保存。使用日本日立 7160 全自动生化分析仪和 r–911 全自动放射免疫计数仪测定血清生化指标。试剂盒均购自生北控股份有限公司和北京华英生物技术研究所。

1.4.3　营养物质消化率的测定

于试验期第28天，在每个重复中选取生长较好、体况相近的断奶仔猪各3头，收集粪样，密封后低温运回实验室，对粪样进行概略养分分析。按照饲料常规分析方法测定饲料和粪便中干物质（DM）、粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）、Ca和P含量，用酸不溶灰分（AIA）标记法计算营养物质消化率[14]。

1.4.4　粪中微生物菌群的测定

于试验期第28天，在每个重复中选取生长较好、体况相近的断奶仔猪各5头，于06:00—08:00间收集粪样，每头猪采集粪样约50 g，即刻运回实验室－4 ℃保存待测。在超净工作台上取0.5 g粪便放入装有4.5 mL灭菌蒸馏水的试管中，振荡混匀后静置10 min；然后吸取0.5 mL液体加入装有4.5 mL灭菌蒸馏水的试管中，振荡混匀后静置10 min。接着进行逐级稀释，选取3个稀释浓度（10^{-2}、10^{-3}和10^{-4}），每个稀释度设3个重复。吸取0.1 mL稀释液滴入相应的培养基中培养。其中，大肠杆菌选用伊红美蓝（EMB）培养基37 ℃恒温培养，24 h后采用平板涂布法进行观察计数；双歧杆菌选用亚硫酸铋（BS）培养基、乳酸杆菌选用乳杆菌选择性（LBS）培养基，37 ℃厌氧箱中培养72 h后观察计数[15]。结果以lg（CFU/g）表示。

1.5　数据的统计分析

试验数据采用 SPSS 19.0 统计软件中的 one-way ANOVA 进行分析，采用 Duncan 氏法进行多重比较，结果均以“平均值±标准差”表示。P<0.05 为差异显著，P>0.05 为差异不显著。

2　结果与分析

2.1　饲粮添加 RECC 对断奶仔猪生长性能的影响

由表 2 可见，各 RECC 组的 ADG 和 ADFI 均高于对照组，其中 0.02%和 0.03% RECC

组的 ADG 和 ADFI 显著高于对照组和 0.04% RECC 组（P<0.05）；0.02%和 0.03% RECC 组的 F/G 显著低于对照组和 0.04% RECC 组（P<0.05）；各 RECC 组仔猪的腹泻率均显著低于对照组（P<0.05）；各 RECC 组死亡率均为 0，表现优于对照组，但差异不显著（P>0.05）。

表 2　饲粮添加 RECC 对断奶仔猪生长性能的影响

Table 2　Effects of dietary RECC on growth performances of weaned piglets

项目 Items	对照组 Control group	RECC 添加水平 RECC supplemental levels/%			P 值 P-value
		0.02	0.03	0.04	
始重 Initial weight/kg	7.56±0.58	7.52±0.33	7.51±0.55	7.54±0.77	0.994
末重 Final weight/kg	18.17±1.87[a]	20.64±1.62[b]	21.75±2.02[b]	18.66±1.77[a]	0.028
平均日增重 ADG/g	393.26±46.45[a]	472.81±26.93[b]	516.23±44.70[b]	414.36±32.77[a]	0.023
平均日采食量 ADFI/g	531.08±38.72[a]	594.87±28.92[b]	635.34±71.05[b]	532.24±43.79[a]	0.034
料重比 F/G	1.36±0.05[a]	1.26±0.06[b]	1.23±0.05[b]	1.32±0.07[a]	0.032
腹泻率 Diarrhea rate/%	4.09±0.87[a]	1.61±0.62[b]	1.75±0.63[b]	2.34±0.92[b]	0.020
死亡率 Rate of mortality/%	1.67±3.34	0.00±0.05	0.00±0.00	0.00±0.00	0.588

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著(P＜0.05)，相同或无字母表示差异不显著(P＞0.05)。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P＜0.05), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (P＞0.05). The same as below.

2.2　饲粮添加 RECC 对断奶仔猪血清生化指标的影响

如表 3 所示，各 RECC 组血清生长激素（GH）含量均高于对照组，其中 0.02%和 0.03% RECC 组血清 GH 含量显著高于对照组和 0.04% RECC 组（P＜0.05）；与对照组相比，各 RECC 组血清胰岛素（INS）、三碘甲状腺原氨酸（T_3）和甲状腺素（T_4）含量均有提高趋势，但差异不显著（P＞0.05）。

表 3　饲粮添加 RECC 对断奶仔猪血清激素水平的影响

Table 3　Effects of dietary RECC on serum hormone levels of weaned piglets

项目 Items	对照组 Control group	RECC 添加水平 RECC supplemental levels/%			P 值 P-value
		0.02	0.03	0.04	
生长激素 GH/(ng/mL)	5.31±0.46[a]	6.27±0.46[b]	6.45±0.65[b]	5.56±0.52[a]	0.028

胰岛素 INS/(μIU/mL)	8.64±1.27	9.17±1.02	9.50±1.36	8.95±1.07	0.775
三碘甲状腺原氨酸 T_3/(ng/mL)	0.72±0.08	0.82±0.06	0.83±0.07	0.75±0.08	0.158
甲状腺素 T_4/(ng/mL)	47.91±7.07	52.56±6.85	53.55±8.44	52.70±7.87	0.721

如表 4 所示，0.02%和 0.03% RECC 组血清免疫球蛋白 G（IgG）含量显著高于对照组（*P*＜0.05），各 RECC 组间血清 IgG 含量差异不显著（*P*＞0.05）；各 RECC 组血清免疫球蛋白 M（IgM）与对照组相比均有提高趋势，但差异不显著（*P*＞0.05）；RECC 对血清免疫球蛋白 A（IgA）含量无显著影响（*P*＞0.05）。

表 4　饲粮添加 RECC 对断奶仔猪血清免疫指标的影响

Table 4　Effects of dietary RECC on serum immune indices of weaned piglets　g/L

项目 Items	对照组 Control group	RECC 添加水平 RECC supplemental levels/%			*P* 值 *P*-value
		0.02	0.03	0.04	
免疫球蛋白 A IgA	1.16±0.08	1.19±0.07	1.15±0.07	1.13±0.09	0.584
免疫球蛋白 M IgM	0.85±0.03	0.92±0.05	0.91±0.05	0.88±0.03	0.094
免疫球蛋白 G IgG	8.44±0.43^{a}	9.38±0.41^{b}	8.96±0.39^{b}	8.60±0.51^{ab}	0.046

如表 5 所示，各 RECC 组血清超氧化物歧化酶（SOD）和过氧化氢酶（CAT）活性与对照组相比差异不显著（*P*＞0.05）。

表 5　饲粮添加 RECC 对断奶仔猪血清抗氧化指标的影响

Table 5　Effects of dietary RECC on the serum antioxidant indices of weaned piglets　U/L

项目 Items	对照组 Control group	RECC 添加水平 RECC supplemental levels/%			*P* 值 *P*-value
		0.02	0.03	0.04	
超氧化物歧化酶 SOD	54.35±5.60	57.59±5.68	60.10±6.75	55.24±5.79	0.237
过氧化氢酶 CAT	1.50±0.17	1.65±0.18	1.56±0.16	1.49±0.11	0.481

2.3　饲粮添加 RECC 对断奶仔猪营养物质消化率的影响

由表6可见，0.02%和0.03% RECC 组能显著提高断奶仔猪 DM、CP 和 EE 消化率（$P<0.05$），其中 DM 消化率分别比对照组提高11.25%和8.79%，CP 消化率分别比对照组提高8.81%和7.15%，EE 消化率分别比对照组高8.65%和5.50%；0.02% RECC 组与对照组相比显著提高 Ca 和 P 消化率（$P<0.05$），分别提高11.67%和9.69%。

表6 饲粮添加 RECC 对断奶仔猪营养物质消化率的影响

Table 6 Effects of dietary RECC on nutrient digestibilities of weaned piglets %

项目 Items	对照组 Control group	RECC 添加水平 RECC supplemental levels/% 0.02	0.03	0.04	*P* 值 *P*-value
干物质 DM	76.81±3.39[a]	85.45±3.72[b]	83.56±2.95[b]	81.35±3.07[ab]	0.038
粗蛋白质 CP	81.30±3.04[a]	88.46±3.24[b]	87.11±3.77[b]	85.76±3.36[ab]	0.048
粗脂肪 EE	74.79±2.46[a]	81.26±2.12[b]	78.90±2.80[b]	76.81±2.74[ab]	0.019
钙 Ca	38.03±2.46[a]	42.47±2.63[b]	40.75±2.15[ab]	39.37±2.37[ab]	0.035
磷 P	39.63±2.01[a]	43.47±1.72[b]	42.60±2.54[ab]	41.78±2.02[ab]	0.044

2.4 饲粮添加 RECC 对断奶仔猪粪中微生物菌群的影响

由表 7 可见，各 RECC 组大肠杆菌数有降低趋势，但差异不显著（$P>0.05$）；0.02%和 0.03% RECC 组双歧杆菌数高于对照组，0.04% RECC 组略低与对照组，但均未达到差异显著水平（$P>0.05$）。

表7 饲粮添加RECC对断奶仔猪粪中微生物菌群的影响

Table 7 Effects of dietary RECC on fecal microbial population of weaned piglets

项目 Items	对照组 Control group	RECC 添加水平 RECC supplemental levels/% 0.02	0.03	0.04	*P* 值 *P*-value
大肠杆菌 *Escherichia coli*	8.15±0.21	7.86±0.19	7.83±0.21	7.78±0.15	0.078
双歧杆菌 *Bifidobacterium*	7.49±0.19	7.56±0.20	7.59±0.24	7.44±0.22	0.740
乳酸杆菌 *Lactobacillus*	7.14±0.18	7.39±0.21	7.42±0.25	7.44±0.21	0.214

3 讨 论

3.1 饲粮添加 RECC 对断奶仔猪生长性能的影响

RECC 同时具有稀土和壳糖胺的化学性质与生理功能，应用于动物饲料中可以对动物的生长性能、营养物质代谢、免疫系统及众多酶等产生类似于抗生素的生理作用[16]。有关 RECC

作为新型饲料添加剂在动物试验上的研究还比较少，但关于稀土的研究表明，稀土可以显著提高动物的生产性能[17]。镧和铈这 2 个元素在稀土中占据了大部分比例，镧系元素具有取代 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+}、Fe^{2+}和 Mn^{2+}金属离子的作用，而 Ca^{2+}在细胞代谢中起着重要的作用。稀土离子与 Ca^{2+}性质和结构相似，进入机体会后可能会取代 Ca^{2+}，进入 Ca^{2+}的结合位点，促进一些蛋白质和酶的活性。Zhao 等[18]研究结果表明，一定剂量的铈离子可以影响细菌的生长，当浓度低于 350 μg/mL 时，会促进大肠杆菌的生长，当浓度高于 400 μg/mL 时，就会抑制大肠杆菌的生长。稀土会改变细菌膜的表面结构而使细菌产生絮凝作用[19]，起到类似抗生素的作用，抑制胃肠道细菌生长，促进仔猪生长。并且，稀土离子中的镧和铈离子能够提高动物肠道内核苷酸水平，从而加速肠细胞的分化、生长和修复，促进小肠成熟，修复受损的肠黏膜，提高动物的肠道机能，降低腹泻率[19-20]。Wang 等[21]给育肥猪饲喂含 100 mg/kg 稀土镧的饲粮使日增重提高了 12.95%，饲料转化率降低了 6.78%；血清中生长激素含量峰值、基线水平和激素含量分别增加了 80.42%、70.99%和 64.91%，且差异显著。研究表明在动物饲粮中添加适量的壳糖胺，能提高动物的生产性能，但是添加量过高会产生负面影响[22]。史彬林等[23]研究发现添加 0.05%壳聚糖会明显提高肉仔鸡的生长性能，但 Tang 等[24]研究发现，给断奶仔猪饲喂 0.1%壳糖胺，日增重降低 7.48%，饲料转化率降低 0.88%。

本试验研究表明，添加适宜水平 RECC 可以显著提高仔猪的 ADG 和 ADFI，降低 F/G，且能提高血清中 GH 和 INS 含量，同时各 RECC 组的腹泻率和死亡率均低于对照组。RECC 能提高猪的生产性能这可能与血清中的 GH 水平有关，这与肖凯[25]的研究结果相同。RECC 能够通过调节仔猪血清激素水平，促进蛋白质的合成，提高机体免疫能力，调节动物的代谢和胃肠道内菌群的平衡，进而起到改善仔猪的生长性能的作用[26]。顾振权等[27]在生长猪饲粮中添加 0.2%～1.0%的稀土甲壳素，使猪体重提高了 5.4%～14.4%，经济效益也增加了 7.3%～36.8%。饲粮中添加 250 g/t 稀土元素氨基酸螯合物使得保育期仔猪采食量增加 2.88%、日增重提高 3.57%，料重比降低；饲粮中添加 350 g/t 稀土氨基酸螯合物采食量降低 11.39%，但日增重提高 2.90%，料重比显著降低，保育期仔猪生长性能得到改善[28]。万辉[29]研究不同水平 RECC 对蛋鸡生产性能影响表明，饲粮中添加 0.2% RECC 使得蛋鸡的产蛋率达到最高峰，平均蛋重、平均产蛋重分别提高 0.73%和 6.83%，极显著高于对照组。本试验效果与以上研究一致，同时也说明稀土和壳糖胺螯合添加确实要优于单独添加。

3.2 饲粮添加 RECC 对断奶仔猪免疫和抗氧化机能的影响

仔猪断奶时消化系统和主动免疫系统尚未发育完善，仍不完全具备自身合成免疫球蛋白的能力[30]，因此容易受外界环境病原微生物的影响产生应激。壳聚糖有免疫调节的作用，

可以增强巨噬细胞的吞噬能力，刺激巨噬细胞产生淋巴因子，启动免疫程序，提高机体的免疫力。Tang 等[24]研究表明，饲粮中添加 0.025%壳聚糖可提高早期断奶仔猪血清 IgA、IgM 和 IgG 含量。Bianco 等[31]报道，RECC 在机体内降解后的产物——壳糖胺可以通过提高碱性磷脂酶 A2 的活性，影响免疫细胞内花生四烯酸的合成与释放，进而启动机体内的特异性免疫应答。而 Mills[32]研究表明，RECC 可以提高诱导型一氧化氮酶的活性，影响免疫细胞内一氧化氮的合成，进而通过其自身的细胞毒性作用启动非特异性免疫。以上试验都说明 RECC 可以提高机体的免疫力，本试验结论与以上一致。动物体液免疫中，IgM 和 IgG 含量与免疫功能呈正相关。本试验中，饲粮添加不同水平 RECC 能在不同程度上提高断奶仔猪血清 IgM 和 IgG 含量，其中 0.02%和 0.03% RECC 组 IgG 含量与对照组差异显著，这说明 RECC 能通过提高机体合成疫球蛋白的能力，进而提高仔猪的免疫功能。

自由基对机体会起到保护作用，但是过多又会对机体造成伤害。稀土在一定条件下，可以增强SOD活性，成为自由基清除剂。注射诱癌剂的小鼠连续饮用稀土水溶液后，体内SOD活性要明显高于未饮用的小鼠[33]。粟建林等[33]研究发现，饲料中添加0.03%RECC能使比目鱼生长性能和饲料利用率显著提高，同时能增强鱼体的免疫指标和抗氧化性能；但当添加过高时则会产生负面影响。本试验中，添加RECC对血清SOD和CAT活性影响虽不显著，但各RECC组血清中这2种酶活性较对照组均有提高，与前人研究结果相似，这表明RECC能在一定程度上提高机体的抗氧化性，消除多余的自由基，减少对细胞的损伤。

3.3　饲粮添加 RECC 对断奶仔猪营养物质消化率的影响

饲粮添加稀土或者壳糖胺都可以提高营养物质的消化利用率。稀土是一类有益和辅助性营养元素，可以参与机体物质代谢，对酶有不同程度的激活效应。Han 等[4]在断奶仔猪饲粮中分别加入氧化锌、抗生素和 0.1%的稀土矿物酵母，结果稀土矿物酵母组仔猪 DM、CP、EE、Ca、P 等营养物质代谢率均高于氧化锌组和抗生素组。Prause 等[35]研究发现，给动物饲喂 0.015%稀土，氮吸收率、能量平衡、碳水化合物吸收率及营养素的消化率显著提高，但添加量增加至 0.030%时则没有表现出显著效果，并提出稀土可能会影响小肠的渗透性，并通过促进动物胃中消化液的分泌来提高不同营养物质的消化率。很多学者认为适量的壳糖胺可以提高蛋白质的消化吸收与利用，Wada 等[36]研究发现壳聚糖影响大鼠对 Ca 的吸收，可以显著提高 Ca 的吸收率。壳糖胺能够使小肠绒毛增加，增大小肠吸收面积，增强营养物质的吸收。本试验结果表明，0.02%和 0.03%RECC 组可以显著提高仔猪 DM、CP 和 EE 消化率，0.02% RECC 组断奶仔猪的 Ca 和 P 消化率也显著提高，这与上述报道一致。此外，RECC 能显著提高仔猪的生产性能这也能说明其可以提高营养物质消化利用率。

3.4　饲粮添加 RECC 对断奶仔猪粪中微生物菌群的影响

稀土对细菌生长有调控作用，适宜浓度的轻稀土元素在生长前期对微生物生长有轻微刺激作用，但随着培养时间的延长，促进作用减弱[37-38]。壳聚糖也具有光谱抗菌活性，Deng 等[39]报道，低聚壳聚糖是一种重要的双歧因子，可调节人体肠道内微生物的代谢活动，改善肠道微生物区系分布，抑制肠道有害菌生长，促进双歧杆菌生长繁殖。张燕婉等[40]研究表明，浓度 0.05%、pH 5.5 的壳聚糖对大肠杆菌有显著地抑制作用，随着壳聚糖分子量降低抗菌效果逐渐增强，分子量为 1 500 左右的低分子壳聚糖抗菌效果最好。壳聚糖抗微生物的机理可能是这类物质中带正电荷及其聚合分子结构，可以使其与病院菌表面的鞭毛剂套膜吸附凝集，抑制病原菌的繁殖，也可以促进肠道有益菌双歧杆菌、乳酸杆菌的增殖，改善小肠代谢能力。本试验中，饲粮添加 RECC 能抑制仔猪粪便中的大肠杆菌数量，提高双歧杆菌和乳酸杆菌数量，有利于节仔猪肠道微生物平衡，这与前人研究结果一致，也与 RECC 组能降低仔猪腹泻率的结论是一致的。

4　结　论

在本试验条件下：

① 饲粮添加 RECC 可显著提高断奶仔猪的 ADG 和 ADFI，同时能显著降低断奶仔猪发 F/G 和腹泻率。

② 饲粮添加 RECC 可显著提高血清 GH 和 IgG 含量，对 IgM 含量有提高趋势。

③ 饲粮添加 RECC 可显著提高断奶仔猪对 DM、CP、EE、Ca 和 P 的消化率。

④ 断奶仔猪饲粮中 RECC 较为适宜的添加量为 0.02%。

参考文献：

[1]　HE M L,RANZ D,RAMBECK W A.Study on the performance enhancing effect of rare earth elements in growing and fattening pigs[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2001,85(7/8):263–270.

[2]　ZHONG Z M,LI P C,XING R G,et al.Antimicrobial activity of hydroxylbenzenesulfonailides derivatives of chitosan,chitosan sulfates and carboxymethyl chitosan[J].International Journal of Biological Macromolecules,2009,45(2):163–168.

[3]　GALLAHER C M,MUNION J,HESSLINK R,Jr.,et al.Cholesterol reduction by glucomannan and chitosan is mediated by changes in cholesterol absorption and bile acid and fat excretion in

rats[J].Journal of Nutrition,2000,130(11):2753–2759.

[4] HAN Y K,THACKER P A.Effects of antibiotics,zinc oxide or a rare earth mineral-yeast product on performance,nutrient digestibility and serum parameters in weanling pigs[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2010,23(8):1057–1065.

[5] SCHIPPER N G M,VÅRUM K M,ARTUSSON P.Chitosans as absorption enhancers for poorly absorbable drugs.1:influence of molecular weight and degree of acetylation on drug transport across human intestinal epithelial (Caco-2) cells[J].Pharmaceutical Research,1996,13(11):1686–1692.

[6] SHIN B C,PARK K B,JANG B S,et al.Preparation of ^{153}Sm-Chitosan Complex for radiation synovectomy[J].Nuclear Medicine and Biology,2001,28(6):719–725.

[7] AGBEDE J O,ARIMAH A A,ADU O A,et al.Growth-enhancing,health impact and bacteria suppressive property of lanthanum supplementation in broiler chicken[J].Archiva Zootechnica,2011,14(2):44–56.

[8] SHIAU S Y,YU Y P.Dietary supplementation of chitin and chitosan depresses growth in tilapia,*Oreochromis niloticus*×*O.aureus*[J].Aquaculture,1999,179(1/2/3/4):439–446.

[9] SCHWABE A,MEYER U,FLACHOWSKY G,et al.Effect of graded levels of rare earth elements in diets of fattening bulls on growing and slaughtering performance,and on nutrient digestibility of wethers[J].Archives of Animal Nutrition,2011,65(1):55–73.

[10] KRAATZ M,TARAS D,MÄNNER K,et al.Weaning pig performance and faecal microbiota with and without in-feed addition of rare earth elements[J].Journal of Animal physiology and Animal Nutrition,2006,90(9/10):361–368.

[11] TAN B,GAO X G,KONG X F,et al.Dietary *L*-arginine supplementation enhances the immune status in early-weaned piglets[J].Amino Acids,2009,37(2):323–331.

[12] HE M L,RAMBECK W A.Rare earth elements-a new generation of growth promoters for pigs?[J].Archiv für Tierernaehrung,2000,53(4):323–334.

[13] CASTILLO M,MARTIN-ORÚE S M,TAYLOR-PICKARD J A,et al.Use of mannanoligosaccharides and zinc chelate as growth promoters and diarrhea preventative in

weaning pigs:effects on microbiota and gut function[J].Journal of Animal Science,2008,86(1):94–101.

[14] WILLIAM H,LATIMER G W,Jr.Association of official analytical chemists.Official methods of analysis of AOAC International[M].18th ed.Gaithersburg:AOAC International,2007:248.

[15] ZHANG L,XU Y Q,LIU H Y,et al.Evaluation of *Lactobacillus rhamnosus* GG using an *Escherichia coli* K88 model of piglet diarrhoea:effects on diarrhoea incidence,faecal microflora and immune responses[J].Veterinary Microbiology,2010,141(1/2):142–148.

[16] 户如霞,程建波,卜登攀,等.稀土壳糖胺螯合盐生物学功能及其在动物生产中的应用[J].动物营养学报,2013,25(8):1703–1707.

[17] ZHANG S Q,ZHANG A Q,YAN J C.Study on the performance enhancing effect of rare Earth elements on fattening pigs,broilers and laying hens[J].Review of China Agricultural Science and Technology,2006,8(1):35–39.

[18] ZHAO R M,LIU Y,XIE Z X,et al.Microcalorimetric study of the action of Ce(Ⅲ) ions on the growth of *E.coli*[J].Biological Trace Element Research,2002,86(2):167–175.

[19] BENTZ J,ALFORD D,COHEN J,et al.La^{3+}-induced fusion of phosphatidylserine liposomes,close approach,intermembrane intermediates,and the electrostatic surface potential[J].Biophysical Journal,1988,53(4):593–607.

[20] RAMBECK W A,WEHR U.Use of rare earth elements as feed additives in pig production[J].Pig News and Information,2005,26(2):41N–47N.

[21] WANG M Q,XU Z R.Effect of supplemental lanthanum on the growth performance of pigs[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2003,16(9):1360–1363.

[22] TARASEWICZ Z,BALICKA-RAMISZ A,SZCZERBINSKA D,et al.Effects of chitosan on selected production characteristics and hatching success of the Pharaoh quail[J].Electronic Journal of Polish Agricultural Universities:Series Animal Husbandry,2003,6(2):63–69.

[23] 史彬林,李德发,朴香淑.壳聚糖对肉仔鸡生长性能及免疫功能的影响[J].中国畜牧杂志,2005,41(1):9–11.

[24] TANG Z R,YIN Y L,NYACHOTI C M,et al.Effect of dietary supplementation of chitosan and galacto-mannan-oligosaccharide on serum parameters and the insulin-like growth factor-Ⅰ mRNA expression in early-weaned piglets[J].Domestic Animal Endocrinology,2005,28(4):430–441.

[25] 肖凯,赵胜军,郑中朝,等.添加稀土壳糖胺螯合盐条件下不同蛋白质水平对蛋鸡生产性能的影响[J].中国饲料,2007(4):25–26.

[26] EVANS C H.Biochemistry of the lanthanides[M].New York:Plenum Press,1990.

[27] 顾振权,宋锦昌.稀土甲壳素对生长肉猪的效应研究[J].中国畜牧杂志,1994,30(3):36–38.

[28] 许甲平,鲍宏云,邓志刚,等.稀土元素氨基酸螯合物对保育期仔猪生长性能的影响[J].饲料工业,2012,33(8):60–62.

[29] 万辉.稀土壳糖胺螯合盐对蛋鸡生产性能及营养物质利用的影响[D].硕士学位论文.武汉:华中农业大学,2008.

[30] KLOBASA F,BUTLER J E,WERHAHN E,et al.Maternal-neonatal immunoregulation in swine.Ⅱ.Influence of multiparity on de novo immunoglobulin synthesis by piglets[J].Veterinary Immunology and Immunopathology,1986,11(2):149–159.

[31] BIANCO I D,BALSINDE J,BELTRAMO D M,et al.Chitosan-induced phospholipase A_2 activation and arachidonic acid mobilization in $P388D_1$ macrophages[J].FEBS Letters,2000,466(2/3):292–294.

[32] MILLS C D.Molecular basis of suppressor macrophages.Arginine metabolism via the nitric oxide synthetase pathway[J].The Journal of Immunology,1991,146(8):2719–2723.

[33] 粟建林,张丽帼,刘建中,等.氯化稀土抑制氨基甲酸乙酯诱发肺癌的研究[J].卫生毒理学杂志,1997,11(3):158–160.

[35] CUI L Q,XU W,AI Q H,et al.Effects of dietary chitosan oligosaccharide complex with rare earth on growth performance and innate immune response of turbot,*Scophthalmus maximus* L[J].Aquaculture Research,2013,44(5):683–690.

[35] PRAUSE B,GEBERT S,WENK C,et al.Seltene erden-alternativer leistungsförderer beim schwein-ein Überblick und erste ergebnisse eines

gesamtstoffwechselversuches[Z].Winterthurerstr:Institut für Tierernährung,2004.

[36] WADA M,NISHIMURA Y,WATANABE Y,et al.Accelerating effect of chitosan intake on urinary calcium excretion by rats[J].Bioscience,Biotechnology,and Biochemistry,1997,61(7):1206–1208.

[37] VALLUZZI R,GUERTIN R P,HAAS T E.Magnetically complexed collagen nanocomposites[J].Philosophical Magazine,2004,84(32):3439–3447.

[38] UEZU K,LRIE S,YOSHIMURA O,et al.Extraction of rare earth metals using liquid surfactant membranes in a mixco extractor[J].Chemical Engineering Research and Design,1997,75(5):513–518.

[39] DENG Z Y,ZHANG J W,WU G Y,et al.Dietary supplementation with polysaccharides from *Semen cassiae* enhances immunoglobulin production and interleukin gene expression in early-weaned piglets[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2007,87(10):1868–1873.

[40] 张燕婉,王光华.壳聚糖对五种食物中毒菌生长的影响[J].微生物学通报,1991,18(6):344–347.

Effects of Rare Earth-Chitosan Chelate on Growth Performance, Serum Biochemical Indices, Nutrient Digestibility and Fecal Microbial Flora of Weaned Piglets

LI Fangfang[1] ZHOU Jing[1] ZHU Yujing[1] ZHANG Xin[1] GAO Yuan[2] MENG Ling[2] GUO Fulai[2] ZHANG Yong[1*]

(1. *College of Animal Sciences and Veterinary Sciences*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*; 2. *Liaoning Debao Argi-Animal Husbandry Co.*, *Ltd.*, *Shenyang* 110171, *China*)

Abstract: This study was conduct to explore the effects of dietary rare earth-chitosan chelate (RECC) on growth performance, serum biochemical indices, nutrient digestibility and fecal microbial flora of weaned piglets. Two hundred and forty healthy Large White piglets weaned at the age of 28 days were selected and randomly assigned to 4 groups with 4 replicates in each group and 15 piglets in each replicate. Pigs in the control group were fed a basal diet, while the others in experiment groups were fed the basal diet supplemented with 0.02%, 0.03% and 0.04%

RECC, respectively. The trial lasted for 28 days. The results showed as follows: 1) compared with the control group, 0.02% and 0.03% dietary RECC significantly increased the average daily gain and average daily feed intake (P<0.05), significantly reduced feed/gain (P<0.05), and dietary RECC significantly reduced the diarrhoea rate of weaned piglets (P<0.05). 2) 0.02% and 0.03% dietary RECC significantly increased the serum growth hormone and immunoglobulin G contents of weaned piglets (P<0.05). 3) 0.02% and 0.03% dietary RECC significantly increased the digestibilities of dry matter, crude protein and ether extract of weaned piglets (P<0.05), and 0.02% dietary RECC significantly increased the digestibilities of Ca and P of weaned piglets (P<0.05). 4) Dietary RECC had no significant effects on the numbers of *Escherichia coli*, *Bifidobacterium* and *Lactobacillus* (P>0.05), but made a trend to reduce the number of *Escherichia coli*. It is concluded that diet supplemented with RECC can improve hormone levels and microbial balance, and then promote growth performance and immune function of weaned piglets. The suitable supplemental level of RECC on weaned piglets is 0.02%.

Key words: RECC; weaned piglets; growth performance; serum biochemical indices; nutrient digestibility; fecal microbial flora

---

*Corresponding author, professor, E-mail: syndzhy@126.com (责任编辑　田艳明)